

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

CONCEPTION ET VALIDATION
EXPÉRIMENTALE D'UN GANT
HAPTIQUE ALIMENTÉ PAR DES
ACTIONNEURS
MAGNÉTORHÉOLOGIQUES POUR LA
MANIPULATION D'OBJETS DANS UN
ENVIRONNEMENT VIRTUEL

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Benjamin BÉDARD

Jury: Jean-Sébastien PLANTE (directeur)
Alexandre GIRARD
Jean-Philippe LUCKING BIGUÉ

RÉSUMÉ

En réalité virtuelle (VR), les systèmes haptiques sont en mesure de fournir un retour de force à l'utilisateur pour des applications de jeux et d'entraînement (simulation). Les interfaces haptiques pour la main sont limitées par les technologies d'actionnement d'aujourd'hui. En effet, la vaste majorité des systèmes robotiques est actionnée par des moteurs DC couplés à un ratio de démultiplication (« gearbox »). Ces systèmes font face à un compromis inévitable entre la densité de couple et la réponse dynamique.

De récentes recherches ont démontrées que les embrayages magnétorhéologiques (MR) couplées à une source de puissance (ex : moteur DC) sont une alternative prometteuse pour l'obtention d'une haute réponse dynamique à un coût moindre. Jusqu'à présent, la technologie MR n'a pas été démontrée pour des systèmes robotiques ayant de multiple (6 et +) degrés-de-liberté (ddl).

Ce mémoire a pour but d'étudier le potentiel de la technologie des embrayages MR pour des applications d'interfaces haptiques VR pour la main.

D'abord, les requis de conception sont établis par la littérature. Ensuite, un système haptique complet permettant aux utilisateurs de manipuler des objets virtuels a été développé basé sur un actionnement à tendons alimentés par des embrayages MR (« tendon-driven manipulator powered by MR actuators », TDM-MR). Ce système haptique utilise un actionnement à configuration semi-distribuée qui permet à deux moteurs DC, couplés à un ratio de démultiplication, de fournir la puissance nécessaire pour alimenter 10 embrayages MR actionnant 7 ddl. Ce système haptique a d'ailleurs été testé expérimentalement. Les résultats démontrent d'excellentes réponses dynamiques, de hautes forces générées et une tolérance aux impacts. Pour finir, un jeu VR consistant à démontrer la performance du prototype auprès de 10 utilisateurs a été développé et très bien reçu par ceux-ci.

Mots-clés : Conception, exosquelette, haptique, touché, robotique, interaction homme-machine, embrayage magnétorhéologique

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	2
1.1 Mise en contexte et problématique	2
1.2 Définition du projet de recherche.....	3
1.3 Objectifs du projet de recherche	3
1.4 Contributions originales.....	4
1.5 Plan du document.....	4
2. ÉTAT DE L'ART	5
2.1 Gants haptiques	5
2.2 Bras robotiques	8
2.3 Systèmes haptiques	9
2.4 Conclusion sur l'état de l'art.....	9
3. DESIGN AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF A HAPTIC GLOVE AND ROBOTIC ARM POWERED BY MAGNETORHEOLOGICAL ACTUATORS FOR DEXTEROUS OBJECT MANIPULATION IN VIRTUAL ENVIRONMENTS	5
3.1 Préambule.....	5
3.2 Abstract	8
1.1 Error! Bookmark not defined.	
3.4 8	
3.5 Introduction.....	8
3.5.1 Motivation.....	8
3.5.2 Background and Literature.....	9
3.5.3 Approach and Results	11
3.6 VR System Design	13
3.6.1 Design Requirements	13
3.6.2 Proposed Design	13
3.6.3 MR Actuation.....	15
3.6.4 Transmission System	17
3.7 Controller Design.....	18
3.8 Experimental Results	20
3.8.1 Laboratory Tests	20
3.8.2 User Experience Tests.....	23

3.9	Conclusion	25
3.10	Lessons Learned and Future Works.....	25
4.	CONCLUSION	27
4.1	Sommaire	27
4.2	Contributions originales.....	27
4.3	Perspectives et travaux futurs	28
5.	LISTE DES RÉFÉRENCES	30
6.		

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Gants Haptiques Tactiles (a) Plexus, (b) Manus et (c) VRfree.....	6
Figure 2.2 : Gants à Retour de Force Semi-Actif (a) HaptX et (b) MR Glove [2].....	6
Figure 2.3 : Gant à Retour de Force Actifs (a) Rutgers Master II , (b) CyberGrasp et (c) Dexmo	7
Figure 2.4 : Bras Robotiques (a) WAM de Barrett [16]et (b) Virtuouse 6D TAO de Haption [17]	8
Figure 2.5 : Système Haptique Complet CyberGraps et CyberForce.....	9
Fig. 3.1 : A Multi-DOF TDM-MR System Powered by a (a) Unique-Actuation Configuration and (b) Shared-Actuation Configuration	12
Fig. 3.2 : The Haptic System	14
Fig. 3.3 : Computer-Assisted Drawing of the (a) Haptic Glove and (b) Robotic Arm	15
Fig. 3.4 : (a) Photograph of the Miniature MR Clutch Used in the Haptic Glove. (b) Cross-Section View of Computer-Assisted Drawing of the MR Clutch (c) Magnetic Circuit View	16
Fig. 3.5 : Actuation System of (a) the Haptic Glove and (b) the Robotic Arm.....	17
Fig. 3.6 : Cables Patterns of (a) the Haptic Glove (b) the Robotic Arm	18
Fig. 3.7 : System Control Loop	20
Fig. 3.8 : Characterizing Maximum Force and Dynamic Response of (a) the Haptic Glove and (b) the Robotic Arm.....	21
Fig. 3.9 : Result of Maximum Fingertip Force and Dynamic Response	22
Fig. 3.10 : Result of Maximum End-Effector Force and Dynamic Response	22
Fig. 3.11 : The Robotic Arm Repeated Impacts Test	23
Fig. 3.12 : (a) Virtual Wall Force (Yellow Arrow), (b) Fingertip Force (Blue Arrow) Combine to a Vertical Cartesian Force (Green Arrow) Applied in the Middle of the Glove.....	24
Fig. 3.13 : (a) Virtual Forces from Slingshot Spring (Yellow Arrows), (b) Resulting virtual forces on Robotic Arms (Green Arrows) and Fingertip Forces (Blue Arrow).....	24
Fig. 3.14 : Dragon Trial.....	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Requis de Conception pour le Gant Haptique et le Bras Robotique.....	5
Tableau 2.2 : Comparaison des Différentes Technologies d’Actionnement Utilisées Pour les Gants à Retour de Force Actifs	7
Tableau 2.3 : Spécifications des bras robotiques existants.....	8
Table 3.1 : Specifications Comparison of Active Force-feedback Gloves Technologies	10
Table 3.2 : Specifications of Existing Interactive Robotic Arms	10
Table 3.3 : Ideal Design Requirements for a Haptic Glove/Arm System	13
Table 3.4 : Key Characteristics of the Haptic Glove and Robotic Arm Systems.....	15
Table 3.5 : Key Characteristics of the MR Clutches Used in the Haptic Glove and Robotic Arm.....	17

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

La réalité virtuelle (VR) permet une multitude d'applications telles que les jeux, la formation de tâches manuelles comme les interventions chirurgicales et la simulation de missions d'exploration militaire ou spatiale complexes. Même si la réalité virtuelle crée des expériences visuelles étonnantes, le sens du toucher (perception haptique) est toujours manquant. Avec l'ajout d'un système haptique pour la main, la réalité virtuelle a le potentiel de devenir une expérience d'immersion totale et de devenir la prochaine génération d'interfaces ordinateur / utilisateur [1]. À terme, les utilisateurs pourraient toucher et manipuler des objets, taper du texte sur des claviers virtuels, toucher des menus 3D et naviguer dans des mondes virtuels [2]. Cependant, l'interaction avec les humains impose le besoin d'actionneurs robotiques aussi performants, sinon meilleurs, que les muscles humains, ce qui pose un défi majeur. En effet, les systèmes VR haptiques sont limités par les technologies d'actionnement qui ne peuvent pas fournir un retour de force de haute qualité aux deux mains tout en étant léger, fiable, robuste tout en étant rentable [3].

Des récentes recherches en laboratoire ont démontré que les manipulateurs actionnés par des embrayages magnétorhéologiques (MR) par l'entremise de câbles (TDM-MR) offrent une excellente réponse dynamique donnée par la haute bande passante et la faible inertie de sortie des embrayages. De plus, cette approche est simple, robuste et rentable, car elle ne repose pas sur des pièces usinées de haute précision. À ce jour, l'approche TDM-MR n'a été évaluée que sur un simple dispositif de preuve de concept à 2 ddl utilisant une configuration d'actionnement distribué où un seul moteur alimente 4 embrayages MR [4]. L'utilisation d'une configuration d'actionnement distribué crée une incertitude au niveau de la robustesse et au niveau des performances d'un système TDM-MR multi-ddls.

En effet, la complexité d'un système TDM-MR multi-DOF basé sur un seul moteur augmente de façon importante pour chaque ddl ajouté, car des composants mécaniques coûteux et complexes, tels que des différentiels, des poulies et des transmissions à tendons doivent être ajoutés afin de

transmettre la puissance au ddl le plus éloigné de la chaîne, résultant en une solution plus volumineuse et moins pratique.

1.2 Définition du projet de recherche

Le sujet principal de mon mémoire de maitrise est l'étude d'une configuration d'actionnement TDM-MR semi-distribuée. Celle-ci divise un système d'actionnement complet en de nombreux sous-systèmes d'actionnement, tous alimentés par leur propre moteur et sous-ensemble d'embrayages MR. Cette configuration pourrait permettre à un système TDM-MR multi-ddls de conserver la simplicité et la robustesse de son mécanisme tout en permettant une conception et une réalisation faciles d'un grand nombre de ddls.

Le potentiel de l'approche semi-distribuée proposée est évalué en développant un prototype fonctionnel conçu pour l'interaction VR. Ses performances sont mesurées par des tests effectués en laboratoire ainsi qu'en évaluant la qualité de l'immersion VR.

Les requis de conception sont établies à partir de la littérature pour guider la conception du système haptique. Une conception est proposée en utilisant un premier sous-système avec un moteur distribuant la puissance à 4 embrayages MR entraînant un gant à retour de force à 4 ddls et un deuxième sous-ensemble avec un moteur distribuant la puissance à 6 embrayages MR entraînant un bras robotisé à 3 ddls conduisant à un système d'interaction VR à 7 ddls avec seulement deux moteurs. Le prototype est fabriqué et testé expérimentalement. Les résultats montrent que le système haptique satisfait et dépasse les exigences prévues. La configuration semi-distribuée TDM-MR est une technologie prometteuse et pratique pour les systèmes robotiques tels que la simulation VR.

1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principale de ce projet est d'évaluer le potentiel d'une configuration à actionnement semi-distribuée utilisant la technologie TDM-MR pour un système haptique multi-ddls. Étant donné que le bras robotique 3 ddls est déjà fabriqué et fonctionnel, les objectifs secondaires sont les suivants :

- Conception d'un gant à retour de force haptique à 4 degrés de liberté (ddls) permettant la sensation de préhension à l'utilisateur, soient 1 ddl pour le pouce, 1 ddl pour l'index, 1 ddl pour le majeur et 1 ddl pour l'annulaire.
- Conception et optimisation d'embrayages MR miniatures (<100g) donnant une qualité de force en bout de doigt égal à l'humain, soit une force 30 N en bout de doigt et une réponse dynamique de 15 Hz.
- Conception d'un jeu VR personnalisé utilisant *Unreal Engine* pour l'interaction homme-machine.

1.4 Contributions originales

La contribution principale de ce projet de recherche est la conception et le test d'une configuration à actionnement semi-distribuée utilisant la technologie TDM-MR pour des applications haptiques en réalité virtuelle.

De cette contribution principale découle trois contributions secondaires :

- La conception d'un gant haptique à retour de force ayant les mêmes propriétés que l'humain en terme de force et de réponse dynamique en bout de doigt.
- La conception d'embrayages MR miniatures (<100g).
- Le contrôle de sous-système d'actionnement en simultané: le gant haptique et le bras robotique

1.5 Plan du document

Le chapitre 2 présente l'état de l'art sur les gants haptiques existants, les bras robotique ainsi que les systèmes haptiques complets pour la manipulation d'objets en réalité virtuelle. Le chapitre 3 présente un article actuellement soumis dans le journal IEEE Robotics and Automation Letters et pour la conférence IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2020) qui aura lieu à Las Vegas (États-Unis) du 25 au 29 octobre 2020. Finalement, le chapitre 4 conclut sur le projet de recherche en mettant en lumière les perspectives et applications futures de la configuration à actionnement semi-distribuée de la technologie TDM-MR.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

Les muscles humains sont parmi les technologies d'actionneurs les plus performants en termes de force, vitesse et puissance pour une masse d'actionneur donnée. Étant donné que les mains humaines sont directement en contact avec les appareils VR, les technologies d'actionneur pour les applications VR doivent atteindre, ou idéalement dépasser les caractéristiques de perception de l'humain. De plus, les technologies d'actionneurs pour les systèmes haptiques doivent être suffisamment pratiques en termes de coûts et de robustesse pour permettre une adoption généralisée. Les requis de conception sont donc basés sur les capacités anthropomorphiques d'un humain moyen. Ces requis sont résumés au Tableau 2.1. Ce chapitre présente d'abord les différents types de gants haptiques, bras robotiques et système haptique complet (gant haptique + bras robotique) existant sur le marché.

Tableau 2.1 : Requis de Conception pour le Gant Haptique et le Bras Robotique

Spec	Description	Valeur Minimum	Unités	Ref.
A	Force générée en bout de doigts (gant)	30	N	[5]
B	Force générée à l'extrémité du bras en tout temps (bras robotique)	50	N	[6]
C	Réponse dynamique (gant & bras robotique)	15	Hz	[1]
E	Résistant aux impacts (gant & bras robotique)	1000*	Cycle	
D	Fiable (gant & bras robotique)			

2.1 Gants haptiques

Plusieurs types de gants haptiques existent sur le marché. Les plus simples sont les gants tactiles (voir Figure 2.1) tels que Plexus [7], Manus [8] ou VRfree [9] ne transmettant pas de réel retour de

force à l'utilisateur. En effet, ceux-ci transmettent des signaux de vibration en bout de doigts simulant la prise ou la manipulation d'objets virtuels [10].



Figure 2.1 : Gants Haptiques Tactiles (a) Plexus [7], (b) Manus [8] et (c) VRfree [9]

Les gants à retour de force semi-actif (voir Figure 2.2) comme HaptX utilisent des freins pour simuler des forces appliquées à la main. Ces forces sont ressentis seulement lorsque l'utilisateur ferme la main (utilisation de freins). Aucune force ne peut être transmise lorsque l'utilisateur ouvre sa main [11].

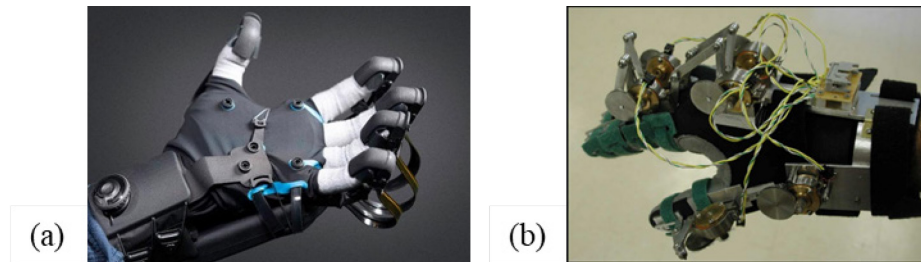


Figure 2.2 : Gants à Retour de Force Semi-Actif (a) HaptX [12] et (b) MR Glove [2]

Les gants à retour de force actifs (voir Figure 2.3) tels que Rutgers Master II [13], CyberGrasp [14] et Dexmo [15] sont actionnés par des moteurs conventionnels ou par des actionneurs pneumatiques. Ils permettent aux utilisateurs de saisir et de ressentir un objet virtuel de la manière la plus naturelle en fournissant des forces en bout des doigts.



Figure 2.3 : Gant à Retour de Force Actifs (a) Rutgers Master II [13], (b) CyberGrasp [14] et (c) Dexmo [15]

Cependant, les *gants à retour de force actif* font face à un compromis inévitable entre la réponse dynamique et la densité de force. En effet, ceux-ci utilisant des actionneurs pneumatiques ont une haute densité de puissance (force/masse donnée) Par contre, ce type d'actionneur a une bande passante inférieure à celle de l'humain [8]. De plus, les actionneurs pneumatiques nécessitent un compresseur à air ou une ligne d'air haute pression à proximité pour le bon fonctionnement des actionneurs, ce qui complexifie la mise en pratique, surtout pour des applications mobiles et autonomes. Ensuite, les actionneurs conventionnels comme les moteurs DC (sans engrenage) sont rapides et ont une faible inertie, mais leur poids élevé est prohibitif. L'utilisation d'engrenages à haut ratio de réduction permet de réduire le poids des moteurs DC, mais ceci augmente l'inertie au point où la réponse dynamique du système devient trop faible pour permettre une bonne sensation de toucher. Le Tableau 2.2 présente les spécifications des *gants à retour de force actifs* utilisant des actionneurs conventionnels.

Tableau 2.2 : Comparaison des Différentes Technologies d'Actionnement Utilisées Pour les Gants à Retour de Force Actifs

Specification	Rutgers Master II	CyberGrasp	Dexmo
Type d'actionneur	Cylindre pneumatique	Moteur DC	Moteur DC avec engrenages
Force max.	16 N	12 N	5 N
Réponse dynamique	10 Hz	40 Hz	N/A
Masse	100g	539g	300g
Notes	Doigts limités par l'actionneur (voir Figure 2.1)		
Références	[13]	[13]	[10]

2.2 Bras robotiques

De même pour les *gants à retour de force actif*, les bras robotiques supportant les gants haptiques sont confrontés au même compromis d'actionneur entre la réponse dynamique et la densité de la force. Les bras robotiques collaboratifs d'aujourd'hui tels que le UR5 de *Universal*, peut présenter une capacité de force suffisante pour interagir avec les humains, mais n'ont pas une réponse dynamique adéquate pour l'interaction homme-machine d'un système haptique [3]. D'un autre côté, les bras robotiques collaboratifs à haute performance dynamique tels que WAM de Barrett et Virtuoso 6D TAO de Haption offrent des performances pratiquement idéales, mais sont conçus en utilisant un moteur DC par articulation donnant à ces robots un prix prohibitif pour les interfaces haptiques grand public. Le Tableau 2.3 illustre les spécifications des bras robotiques collaboratifs utilisant les technologies d'actionneurs conventionnelles.

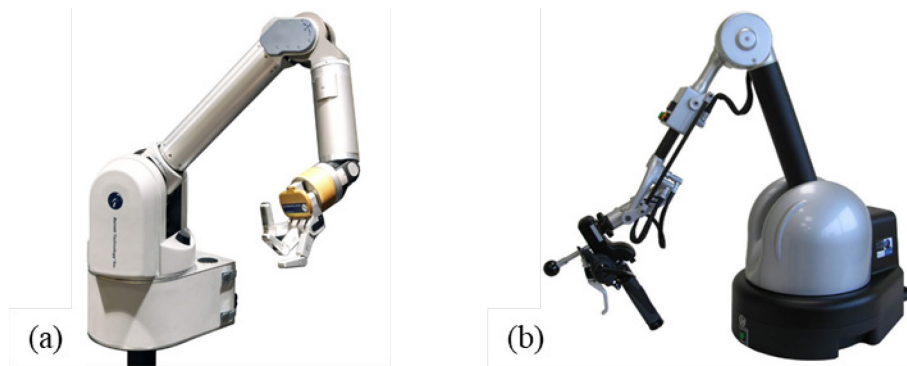


Figure 2.4 : Bras Robotiques (a) WAM de Barrett [16] et (b) Virtuoso 6D TAO de Haption [17]

Tableau 2.3 : Spécifications des bras robotiques existants

Specification	UR5	Barrett WAM	Haption VIRTUOSE 6D TAO
Type d'actionnement	Moteur DC et <i>harmonic drive</i>	Moteur DC et transmission à câbles	Moteur DC et transmission à cabestan
Charge utile	5 kg	3-4 kg	12 N (Constant)
Vitesse max.	1 m/s	3 m/s	N/A
Charge en rotation	18.4 kg	3.3-5.8 kg	12 kg
Puissance max	200 W	800 W	540 W
Prix	45 500 USD	148 000 USD	101 000 USD
Références	[18]	[16]	[17]

2.3 Systèmes haptiques

Le seul système haptique VR complet existant est une combinaison du CyberGrasp (gant haptique) et du CyberForce (bras robotique). Le système représente une étape importante pour la manipulation d'objets dans des environnements virtuels, mais fait toujours face au compromis de performance imposé par les technologies d'actionneur actuelles. Le système a une réponse dynamique élevée (40 Hz) mais une faible force du bout des doigts (12 N) et une faible force cartésienne (8,8 N) par rapport aux capacités humaines (50N) [19].



Figure 2.5 : Système Haptique Complet CyberGraps et CyberForce

2.4 Conclusion sur l'état de l'art

Les gant haptiques, les bras robotiques et un système haptique complet sont détaillés dans l'état de l'art. Aucun des systèmes haptiques présentés obtient des valeurs anthropomorphiques en termes de qualité de force en plus d'être robuste et fiable.

L'approche proposée d'utilisation d'embrayages MR (TDM-MR) en configuration à actionnement distribué pour un système haptique multi-ddls permettrait d'obtenir les performances souhaitées

CHAPITRE 3

Design and Experimental Validation of a Haptic Glove and Robotic Arm Powered by Magnetorheological Actuators for Dexterous Object Manipulation in Virtual Environments

3.1 Préambule

Auteur et affiliation :

Benjamin Bédard : Étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique, Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT)

- Contributions : Conception et fabrication du gant haptique et des embrayages MR du gant. Acquisition de données de la performance du gant haptique (caractérisation)

Louis-Philippe Lebel : Étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique, Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT)

- Contributions : Membre de l'équipe qui a conçu et fabriqué le bras robotique, Control du robot. Acquisition de données de la performance du bras robotique (caractérisation)

Busque Bruno-Pier : Étudiant au baccalauréat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique, Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT)

- Développement du jeu VR, interaction entre VR et système haptique

Denninger Marc : Ingénieur Mécanique, Exonetik

- Aide conception du bras robotique et des embrayages MR

Julio G., Girard A : Ingénieur Mécanique, Exonetik

- Aide conception du bras robotique et des embrayages MR

Alexandre Girard : Professeur adjoint, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique, Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT)

- Aide contrôle du robot

Jean-Sébastien Plante : Professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique, Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT)

- Aide conception gant, bras robotique et embrayages MR et aide contrôle en général.

Revue: IEEE Robotics and Automation Letters

Référence : Bedard B., Lebel L.-P., Busque B.-P., Denninger M., Julio G., Girard A. and Plante J.-S. «Design and Experimental Validation of a Haptic Glove and Robotic Arm Powered by Magnetorheological Actuators for Dexterous Object Manipulation in Virtual Environments. » IEEE Robotics and Automation Letters, 2020

Titre français : Conception et validation expérimentale d'un gant haptique et d'un bras robotique alimentés par des actionneurs magnétorhéologiques pour la manipulation d'objet dans un environnement virtuel.

Résumé français :

Les systèmes haptiques sont couramment utilisés dans plusieurs applications pour fournir un retour de force aux utilisateurs. La plupart de ces systèmes utilisent des actionneurs conventionnels tel que des moteurs électriques. Cependant, ces actionneurs font face à un compromis inévitable entre la densité de force et la réponse dynamique. Des récentes recherches en laboratoire ont démontré que les manipulateurs actionnés par des embrayages magnétorhéologiques (MR) par l'entremise de câbles (TDM-MR) offrent une excellente réponse dynamique donnée par la faible inertie de sortie des embrayages combinée à leur haute densité de force. De plus, cette approche est simple, robuste et rentable, car elle ne repose pas sur des pièces usinées de haute précision. Cet article propose un système haptique à 7 ddls utilisant une configuration à actionnement partagé composée d'un gant haptique 4 ddls et d'un bras robotique 3 ddls. Les choix de conception sont expliqués et le prototype a été testé en laboratoire pour valider ses performances. Les résultats montrent que le système haptique est capable de générer des forces similaires à l'humain au bout des doigts et de la main, tout en ayant une réponse dynamique supérieure à celle d'un humain. Le prototype s'est également révélé fiable et résistant aux chocs. Le système haptique a été testé dans un jeu VR demandant aux utilisateurs de ressentir des murs virtuels, des forces de ressorts (gradient prédéfini) et des forces d'impact. Les commentaires généraux des utilisateurs sur la simulation VR sont positifs.

Contribution au document :

Cet article représente la principale contribution à ce projet de recherche. Ce dernier présente d'abord les gants haptiques, bras robotiques et systèmes haptiques existants, puis une solution utilisant des manipulateurs actionnés par des embrayages magnétorhéologiques (MR) par l'entremise de câbles est présentée. La conception mécanique du système haptique entier basé sur des requis anthropomorphiques est présentée ainsi que son contrôle en boucle ouverte. L'article

présente les différents tests exécutés en laboratoire démontrant l'obtention des performances souhaitées. Les résultats de ces tests sont présentés et discutés.

3.2 Abstract

Haptic systems are commonly used in multiple applications to give force feedback to users. Most of those systems use electric motors as actuation. However, this actuation has an inevitable trade-off between torque density and dynamic performance. Magnetorheological (MR) clutches coupled with a power source are promising as actuators in haptic system. Indeed, MR actuation have an excellent dynamic performance and good force to weight ratio. This paper proposes a tendon-driven manipulator with MR actuators (TDM-MR) using a shared-actuation configuration composed of a 4- DOF haptic glove and a 3-DOF robotic arm as an innovative haptic system. Design choices are explained and the prototype was tested in laboratory to validate its performances. Results show that the overall system is able to generate forces similar to human at the fingertips and the hand, while having superior dynamic response than a human. The prototype has also proven to be reliable and resistant to impact. The haptic system has been tested in a custom VR game asking the users to feel virtual walls, predefined gradient springs and sudden recoil forces. Overall comments from users on the simulation are positive.

3.3 Introduction

3.3.1 Motivation

Virtual Reality (VR) is increasingly used in a multitude of computer applications such as gaming, training for dexterous manual tasks like welding or delicate surgical interventions, and simulations of complex group missions in military or space exploration [19]. Even though VR creates amazing visual experiences, it still misses the sense of touch (haptic) [2]. With the addition of a high-fidelity haptic system for the hand, VR has the potential to become a total immersion experience and become the next generation of computer/user interfaces [20]. At terms, users could touch and manipulate objects, type text on virtual keypads, touch 3D menus, and navigate in virtual worlds as represented in fiction novels such as Ready Player One [21]. Interacting with humans imposes the need for robotic actuators that are at least as good, if not better, than human muscles to perform a complet immersion in the VR. However, a widespread adoption of today's haptic VR systems is

limited by actuation technologies that cannot provide a high-quality force feedback to both hands while being lightweight, reliable and robust [11] [see Table 3.1].

3.3.2 Background and Literature

A full haptic VR system for the hand would consist in the combination of a haptic exoskeleton glove that gives grip sensation and a collaborative robotic arm that generates force fields in operational coordinates (Cartesian workspace) to simulate gravity, contact forces and inertial reactions.

Various types of haptic exoskeleton gloves for VR manipulation have been proposed. The simplest being *Vibratory Tactile feedback* gloves like Plexus [7], Manus [8] or VRfree [9] that do not transmit real-forces to the fingertips but rather send vibration signals to the fingertips when the user is holding or touching something in a virtual environment [10]. *Semi-active Force-feedback* gloves like HaptX use brakes to simulate dissipative forces applied to the hand, but cannot provide a full grasping sensation [11]. *Active Forces-feedback* gloves such as Rutgers Master II [22], CyberGrasp [23] and Dexmo [24] are actuated by conventional electromagnetic or pneumatic actuators. They allow users to pick up and feel a virtual object in a more natural way by providing dissipative as well as energizing fingertips forces. Table 3.1 illustrates the specifications of *Active Force-feedback* gloves using conventional actuator technologies.

The performance of *Active Forces-feedback* gloves face an inevitable trade-off of quality of force (dynamic response) and force density (device weight). Indeed, electromagnetic actuators such as direct drive (gearless) DC motors are fast and have low inertia, but their high costs and weights are prohibitive. Using high reduction ratio gearbox reduces the weight of DC motors, but increases the reflected inertia that impedes dynamic response of the system, which rapidly becomes significantly lower than human capabilities. On the other hand, pneumatic actuators are lightweight and powerful, but are not fast enough to follow human finger motion [25].

Table 3.1 : Specifications Comparison of Active Force-feedback Gloves Technologies

Specification	Rutgers Master II	CyberGrasp	Dexmo
Actuator type	Pneumatic	Direct drive DC motor	Geared motor
Max. force	16 N	12 N	5 N
Dynamic	10 Hz	40 Hz	N/A
Weight	100g	539g	300g
Notes	Finger range limited by actuator stroke	N/A	N/A
References	[13]	[13]	[24]

Similarly to *Active Forces-feedback* gloves, the robotics arms supporting these gloves face the same actuator trade-off between quality of force and force density. Today's collaborative robotic arm standard, such as Universal's UR5, may present sufficient force capabilities to interact with humans, but they lack the dynamic response [3] to follow the movements. On the other hand, the high dynamic performance collaborative robotic arms such as Barrett's *WAM* and Haption's *Virtuose 6D TAO* offers practically ideal performances, but are designed using one DC motor per joint give those robots a prohibitive price tag for mainstream haptic interfaces. Table 2 illustrates the specifications of collaborative robotic arms using conventional actuator technologies.

Table 3.2 : Specifications of Existing Interactive Robotic Arms

Specification	UR5	Barrett WAM	Haption VIRTUOSE 6D TAO
Actuator type	DC motor, harmonic drive	DC motor, cable transmission	DC motor, capstan reduction ratio
Rated Payload	5 kg	3-4 kg	12 N (Constant)
Max velocity	1 m/s	3 m/s	N/A
Weight in motion	18.4 kg	3.3-5.8 kg	12 kg
Power	200 W (typical)	800 W (Peak)	540 W (Peak)
Price	45 500 USD	148 000 USD	101 000 USD
References	[18]	[26]	[6]

The only existing fully integrated haptic VR system using a glove and arm configuration is based on the combination of the CyberGrasp (haptic glove) and the CyberForce (robotic arm). The system represents a significant milestone in object manipulation in VR environment but still faces the performance trade-off imposed by current actuator technologies. The system has a high dynamic response (40 Hz) but a low fingertip force (12 N) (see Table 3.1) and a low Cartesian forces (8.8 N) (see Table 2) compared to human capabilities (50N) [14].

Recent works showed that Tendon-Driven Manipulators actuated by Magnetorheological (MR) clutches (TDM-MR) have excellent dynamic response given by the clutches' low output inertia combined with their high force density [3]. In addition, the approach is simple and cost effective since it does not rely on high-precision machined parts (e.g. harmonic drives) or expensive materials (e.g. rare earth magnets). The TDM-MR approach has only been evaluated on a simple 2-DOF proof-of-concept device using a single-actuation configuration where a single motor powers many MR clutches [3]. This approach hasn't been tested on more complex multi-DOF (6+) real-world robotic application.

3.3.3 Approach and Results

Using a distributed actuation configuration creates an uncertainty on the performance of a multi-DOF TDM-MR system. Indeed, the complexity of a multi-DOF TDM-MR system based on a single motor increases exponentially for every DOF added since expensive and complex mechanical components, such as differentials, pulleys, and tendon transmissions, need to be added in order to transmit the power to the furthest DOF in the chain, resulting in a bulkier and less practical solution.

This paper studies the potential of a semi-distributed TDM-MR actuation configuration dividing a distributed actuation system (see Fig. 3.1(a)) in many actuation subsystems (see Fig. 3.1(b)) powered by their own motor and subset of MR clutches. This configuration could allow a multi-DOF TDM-MR system to conserve its mechanism simplicity and robustness while allowing for an easy design and realization of a large number of DOFs.

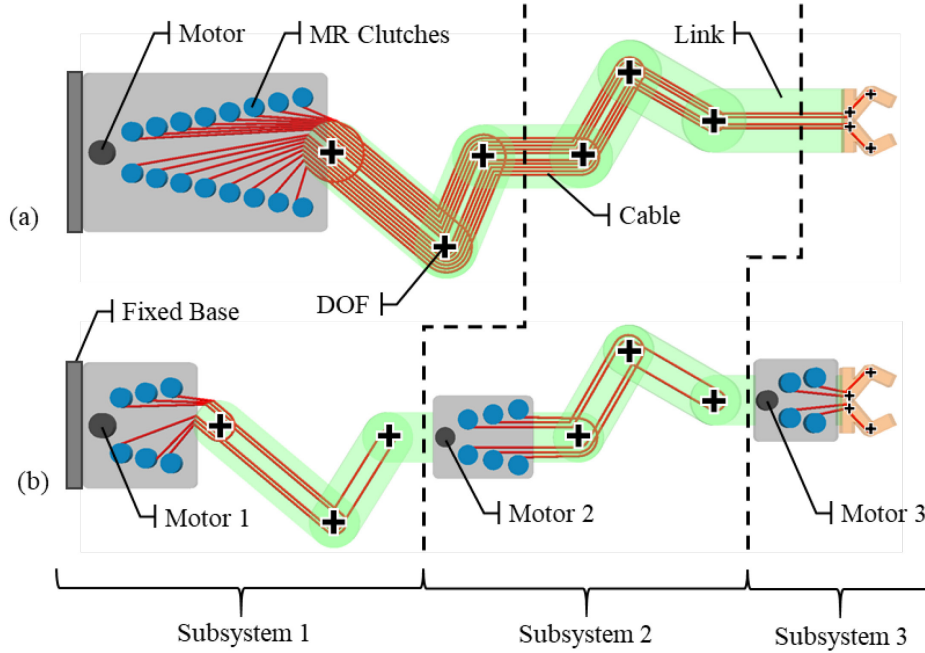


Fig. 3.1 : A Multi-DOF TDM-MR System Powered by a (a) Unique-Actuation Configuration and (b) Shared-Actuation Configuration

The potential of the proposed semi-distributed approach is assessed by developing a fully functional prototype designed for VR interaction and measuring its performance experimentally. Ideal design requirements are established from literature data to guide the design of the device.

A design is proposed using a first subsystem with one geared motor distributing power to 4 MR clutches driving a 4-DOF force-feedback glove (see Fig. 3.1 (b), Subsystem 3), and a second subset with one geared motor distributing power to 6 MR clutches driving a 3-DOF robotic arm (see Fig. 3.1 (b), Subsystem 1) leading to a 7-DOF VR interaction system with only two geared motors. A prototype is fabricated and a simple controller implemented. Custom test benches with load cells are used to identify the maximum force and dynamic response of the haptic glove and robotic arm. The system is also tested by running a user feedback experience where users grasp, hold and pull objects in a virtual world. Results show that the device meets or exceeds anticipated requirements and suggest that a semi-distributed configuration using TDM-MR actuators is a promising and practical technology for robotic systems such as VR simulation.

3.4 VR System Design

3.4.1 Design Requirements

Animal muscles are amongst the most performing actuator in terms of force, speed and power for a given actuator mass. Since human hands are directly in contact with VR devices, actuator technologies for VR applications must at least meet, or ideally exceed animal muscles performance to be transparent to users. Moreover, actuator technologies must be practical enough in terms of costs and robustness to allow a widespread adoption. Anthropomorphic as well as practical design requirements for a VR system are derived from established ideal targets in the literature and are summarized in Table 3.3.

Table 3.3 : Ideal Design Requirements for a Haptic Glove/Arm System

Spec.	Description	Minimum Target	Units	Ref.
A	Force generated at fingertips (glove)	30	N	[5]
B	Force generated at the end-effector at any time (robotic arm)	50	N	[18]
C	Dynamic response (glove & robotic arm)	15	Hz	[1]
E	Resist to impacts (glove & robotic arm)	1000*	Cycle	
D	Reliability (glove & robotic arm)			

*The haptic interface needs to withstand multiple (>1000) impacts at high speed ($>1\text{m/s}$)

3.4.2 Proposed Design

The use of MR clutches in robotic systems is the mechanical equivalent of using transistors in power electronics. As in electronics, possible system topologies are almost endless. Here, the proposed shared-actuation TDM-MR system consists in the combination of 2 subsystems, which is (1) a 4-DOF haptic exoskeleton glove giving fingertip forces and (2) a 3-DOF robotic arm generating Cartesian forces (see Fig. 3.2) making a 7-DOF haptic system. Each device is independent and powered by its own geared motor distributing power to a subset of MR clutches. Hence, only two geared motors are used for the full system minimizing complexity, costs, and weight/inertia. The glove and robotic arm devices are coupled by a passive gimbal transmitting Cartesian forces to the hand.

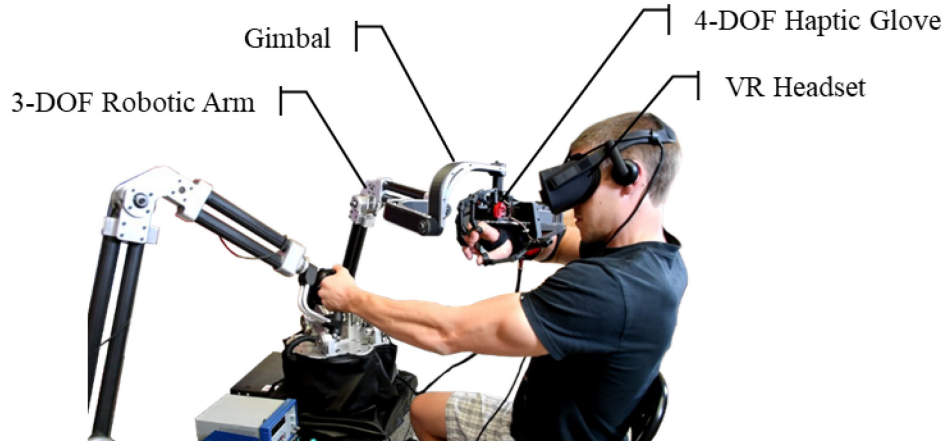


Fig. 3.2 : The Haptic System

The 4-DOF haptic glove is actuated by an array of 4 miniatures MR clutches pulling on 4 cables connected to 4 fingers: ring, middle, index and thumb (see Fig. 3.3(a)). The whole mechanism is mounted on an exoskeleton composed of an adjustable *Formedica* wrist brace and 3D printed parts. Users are tied up at the tip of their fingers with *Velcro* strips providing a strong and adjustable fixation.

The 3-DOF robotic arm uses an antagonist configuration, thus 2 MR clutches are used to actuate 1-DOF. The 3-DOF are located at (1) the elbow, (2) the shoulder and (3) the base (see Fig. 3.3(b)) which give Cartesian forces to the user in a radius of 0.9 m. A remote architecture locating all actuators in the robot base is selected to keep the arm as light as possible (see Fig. 3.3(b)). For simplicity of cable routing, actuators are mounted on a rotating base to facilitate cable routing on the planar 2-DOF arm. The inertia penalty of having actuators rotating with the base has been verified and is low enough to maintain a bandwidth of 15 Hz. The structure of the 2-DOF arm is an assembly of stock carbon fiber tubes and aluminum connectors. Table 3.4 shows the key characteristics of the haptic glove and robotic arm.

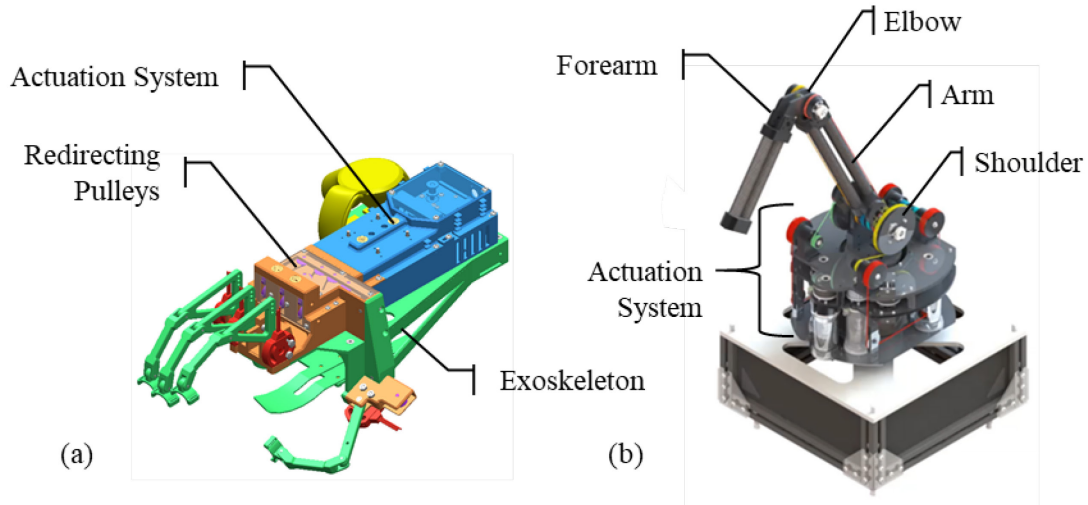


Fig. 3.3 : Computer-Assisted Drawing of the (a) Haptic Glove and (b) Robotic Arm

Table 3.4 : Key Characteristics of the Haptic Glove and Robotic Arm Systems

Parameters	Haptic Glove	Robotic Arm
Mass (total)	1.37 kg	85 kg
Mass (in motion)	0.06 kg	2.32 kg
Max. end-effector speed	457 deg/s	3.5 m/s
Cooling system	Heatsink and air fans	Air fans
Cable material	Dyneema	7X49 steel
Position tracking		
Brand	VEX / Oculus Touch controller	CUI Inc
Type	Potentiometers / Motion tracker	Encoders
Electric motor		
Brand	Maxon	Kollmorgen
Series	EC-45 Flat	AKM43L
Max. Continuous torque	0.130 N·m	3.78 N·m
Rated speed	6000 RPM	4020 RPM
Power	70 W	1.2 kW
Reduction ratio system		
Ratio	16:1	10:1
Type	Timing belt pulley	Gearbox
Brand	SDP	Shimpo
MR Clutches		
Max. Torque	0.200 N·m	6.5 N·m

3.4.3 MR Actuation

The fundamental advantage of the MR fluid technology is that it decouples the inertia, the friction and the backlash of the power source (e.g. motor and gearbox) from the actuated system. The dynamic response of the whole actuation chain is then only affected by the low-inertia of the MR

clutches' output shafts. Torque transmission is adjusted by varying the viscosity of the MR fluid under a magnetic field. As no moving parts are in contact, MR clutches do not require high precision machining making them low cost, reliable and impact resistant.

The MR clutches of the haptic glove and robotic arm are both based on a drum configuration allowing for easy torque multiplication by using multiple shear surfaces directly machined in the rotors (e.g. see the haptic glove embodiment in Fig. 3.4). The input rotor is the clutch housing while the output rotor is the shaft in order to minimize output inertia. A non-rotating coil controls the apparent viscosity of the MR fluid and is mounted on the clutch's frame. Magnetic flux is transferred through air-gaps.

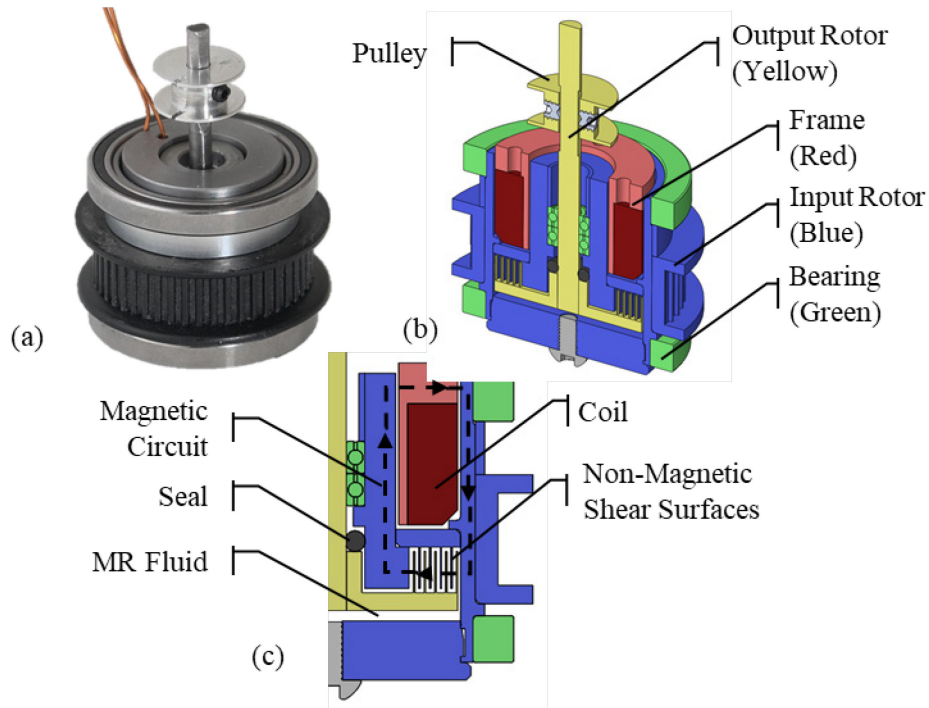


Fig. 3.4 : (a) Photograph of the Miniature MR Clutch Used in the Haptic Glove. (b) Cross-Section View of Computer-Assisted Drawing of the MR Clutch (c) Magnetic Circuit View

The haptic glove requires the best performing MR clutches in terms of dynamic performance because they are interacting with fast-acting human fingers. Using a non-magnetic material for shear surfaces was found to improve the torque-to-inertia ratio, and thus, the dynamic performance, by a factor of 1.6 because inertia reduces faster than shear stress capabilities. The output rotors of the haptic glove are therefore made in aluminum to prioritize torque-to-inertia ratio while the output rotors of the bigger clutches used in the robotic arm are made from low carbon steel to prioritize

the torque-to-weight ratio. Table 3.5 shows the key characteristics of the MR clutches used in the haptic glove and robotic arm.

Table 3.5 : Key Characteristics of the MR Clutches Used in the Haptic Glove and Robotic Arm

Parameters	Haptic Glove	Robotic Arm
Maximal torque	0.200 N·m	6.5 N·m
Minimum torque	0.015 N·m	0.03 N·m
Maximal current	8 A	8 A
Weight	84.3 g	410 g
Outer diameter	35.2 mm	50 mm
Width	27.25 mm	67 mm
Number of fluid gaps	10	8
Number of coil turns	110	171
Coil wire	24 AWG	24 AWG
MR fluid	LORD 140 BC	LORD 140 BC
Magnetic housing	ANSI 1018	AISI 1010

3.4.4 Transmission System

A belt transmission is used to transfer power from the motors to the clutches. Belts are lightweight and quieter in operation than gears. The haptic glove uses two belt reduction stages making up a total reduction ratio of 16 (see Fig. 3.5(a)). With a constant input speed of 6000 RPM, the electric motor provides a maximal finger rotation speed of 457 deg/s, which is faster than humans [28]. The robotic arm uses a planetary gearbox combined to a belt reduction stage for a total reduction ratio of 10 (see Fig. 3.5 (b)). With a constant input speed of 4020 RPM, the electric motor provides a maximal end-effector speed of 3.5 m/s, which is high enough to follow the movement of the human hand.

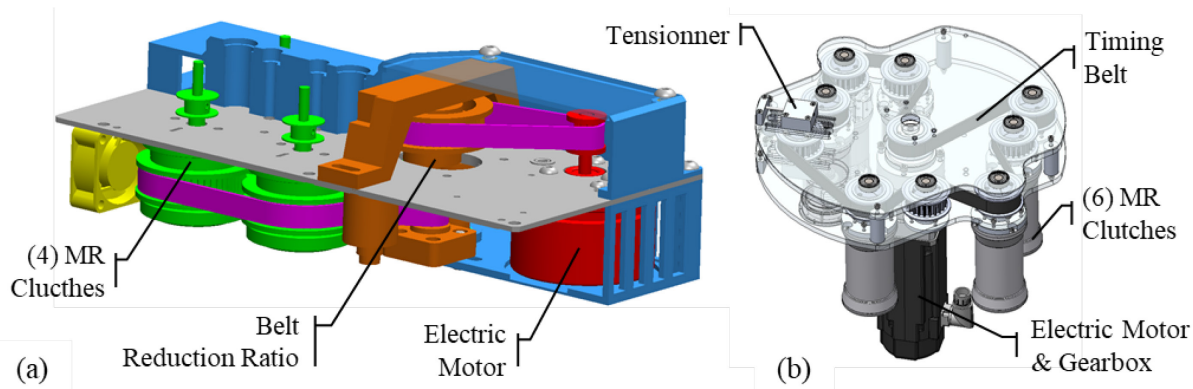


Fig. 3.5 : Actuation System of (a) the Haptic Glove and (b) the Robotic Arm

Cable transmissions are used to transfer power from the clutches to the end-effectors of each system in a one cable per MR clutch arrangement (see Fig. 3.6). Cables go through redirection pulleys to achieve the required torque at joint. The haptic glove uses only one MR clutch per actuated finger to generate forces in only one direction that is blocking the hand from closing. For example, the user can feel the rigidity of a tennis ball in his hand. The robotic arm uses an antagonist configuration where every DOF of the robotic arm is actuated by 2 MR clutches pulling on 2 cables, one CW and one CCW, to provide bi-directional Cartesian forces capabilities in all 3 axes. The robotic arm cables pass through ratio multiplying pulleys to increase torques at joint.

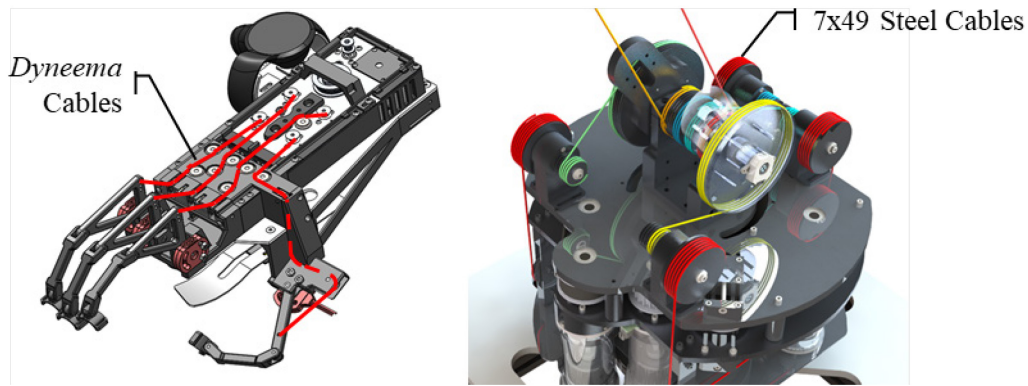


Fig. 3.6 : Cables Patterns of (a) the Haptic Glove (b) the Robotic Arm

Cable drives face the challenges of cable stretch and cable fatigue. Cable stretch is not an issue when using MR clutches in a reel configuration since their high backdrivability automatically compensates any cable lengthening due to stretching. Cable fatigue is addressed by using the best performing cables within their design specifications. The haptic glove is space limited and redirecting pulleys must have low radius (up to 3 mm). *Dyneema* synthetic cables are used because they have the lowest bending radius of all engineering cable materials. The robotic arm is designed to transfer high tension loads and is expected to have a high fatigue life (~1M cycles). Thus, *Carl Stahl* 7X49 steel cables wrapped in a nylon shield are used for the robotic arm.

3.5 Controller Design

Users need an easy and intuitive way to interact in the virtual world handling the haptic system. Thus, finger positions are tracked with VEX potentiometers located above metacarpophalangeal joints of the user's hand and an *Oculus Touch Controller* mounted on the glove gives the user's hands position to virtual environment using *Oculus's* sensors with a spacial resolution of 0.3 mm.

Unreal engine 4.2's virtual environment is selected as an easy to use VR simulation platform. *Unreal engine*'s physics (*PhysX 3.3* by *Nvidia*) generates Cartesians and fingertips reaction forces in real-time by detecting collisions between the user's hands and virtual objects.

The control system scheme is shown in Fig. 3.7. Two identical robotic arms are used for the left and right hands but only the right hand is fitted with a haptic glove prototype. A serial communication is used between the virtual environment's computer running *Unreal engine 4.2* and the computer running the two force controllers (*SpeedGoat* real-time machine), one for the haptic glove and one for the two robotic arms. Force control is done in open-loop with excellent results as MR systems are highly linear and free of unwanted effects such as friction, inertia, backlash and stick-slip behavior. Forces at the user's hand are thus simply generated by using the real-time Jacobian matrix of both robotic arms (left and right). The relationships between the current sent to the clutches and the resulting force output for all clutches have been characterize to obtain the best possible accuracy on the generated forces.

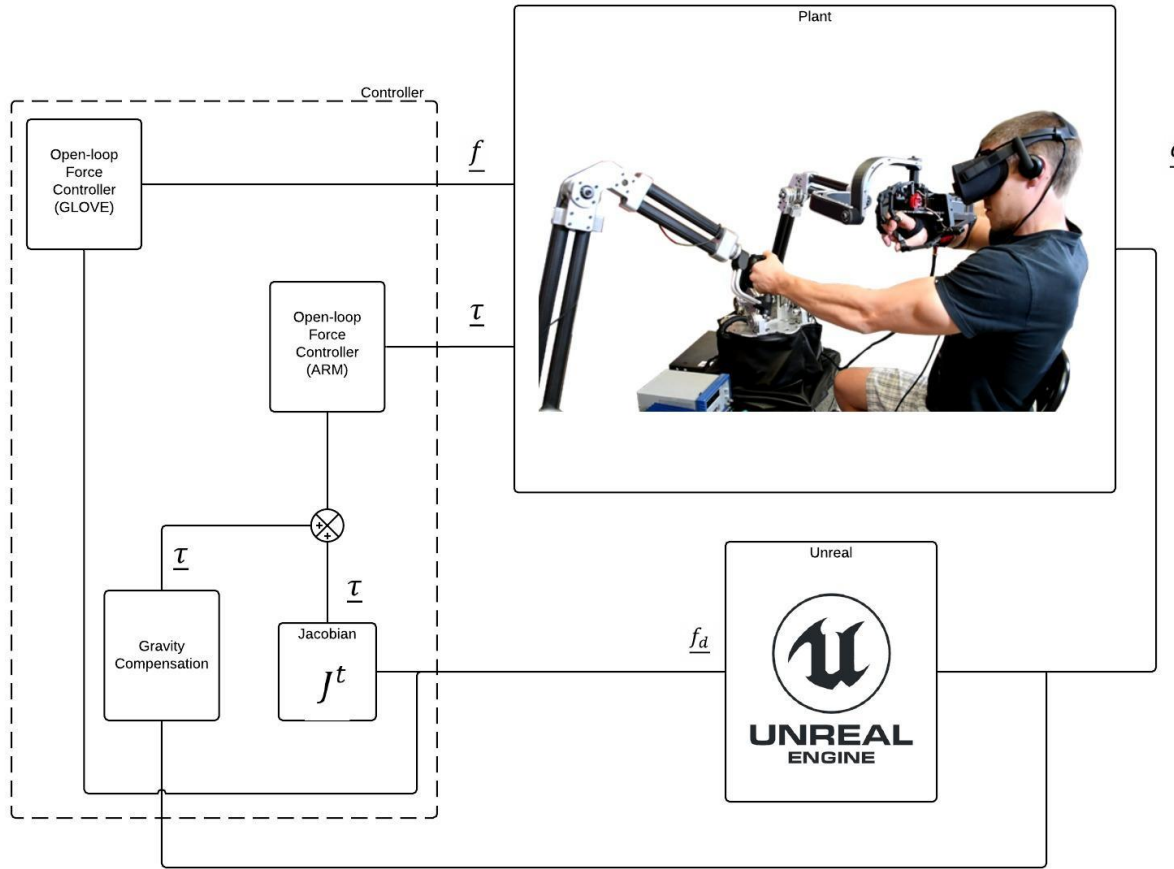


Fig. 3.7 : System Control Loop

The ability to simulate high-stiffness objects depends mostly on the sampling rate of the data-acquisition and the spatial resolution of the encoders [29]. Even if the *Unreal engine* and *Oculus* systems are not design for physical feedback interaction, the sampling rate of *Unreal engine* and position accuracy of the *Oculus*'s sensor were found to be sufficient for gaming applications. However, high fidelity applications such as touching a bone in a medical simulation would require using a better position measurement (e.g. using the robotic arm encoders) and a dedicated high-sampling time system.

3.6 Experimental Results

3.6.1 Laboratory Tests

Methodology

Performance of the haptic glove and robotic arm is measured by mounting a load cell in a block output configuration while sending current inputs to the clutches. For the haptic glove, each finger is individually characterized with a load cell (*Sensortronics 60001-50*) blocking its output (see Fig. 3.8(a)). For the robotic arm, the end-effector of the robotic arm was placed in the furthest and weakness geometric configuration and fixed to a solid structure equipped with a multi-axis sensor (*ATI F/T sensor Mini45*). Torque is applied at the arm's elbow joint (see Fig. 3.8(b)), since its longer tendon transmission make it the most limiting joint.

All tests are implemented in a real-time *Speedgoat* target machine through a *MATLAB/Simulink* interface. The robotic arm has received more than 200 impacts at 1 m/s at end-effector.

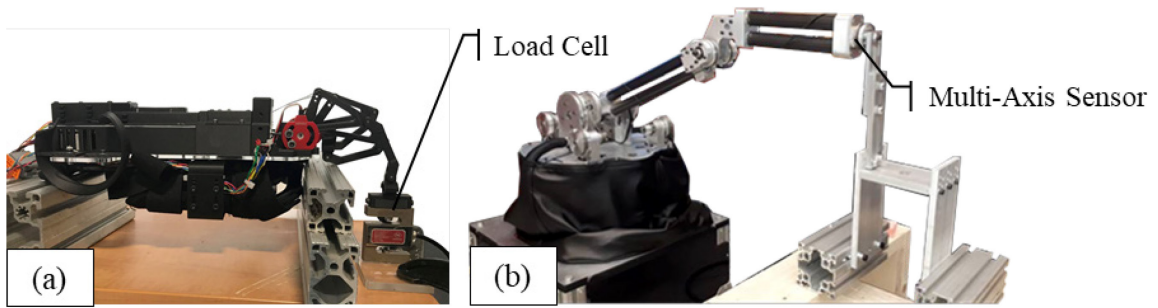


Fig. 3.8 : Characterizing Maximum Force and Dynamic Response of (a) the Haptic Glove and (b) the Robotic Arm

Results

Haptic Glove: A maximum force of 27 N is measured at the fingertips (see Fig. 3.9) by ramping the current between 0 A to 8 A. Dynamic response is tested with a logarithmic chirp for frequencies ranging 0.1 Hz to 200 Hz with forces oscillating from 3 N to 15 N (corresponding to 0.5 A to 3.5 A). A phase-limited blocked-force bandwidth is measured at 150 Hz, which highly exceeds the expected requirement (see Fig. 3.9).

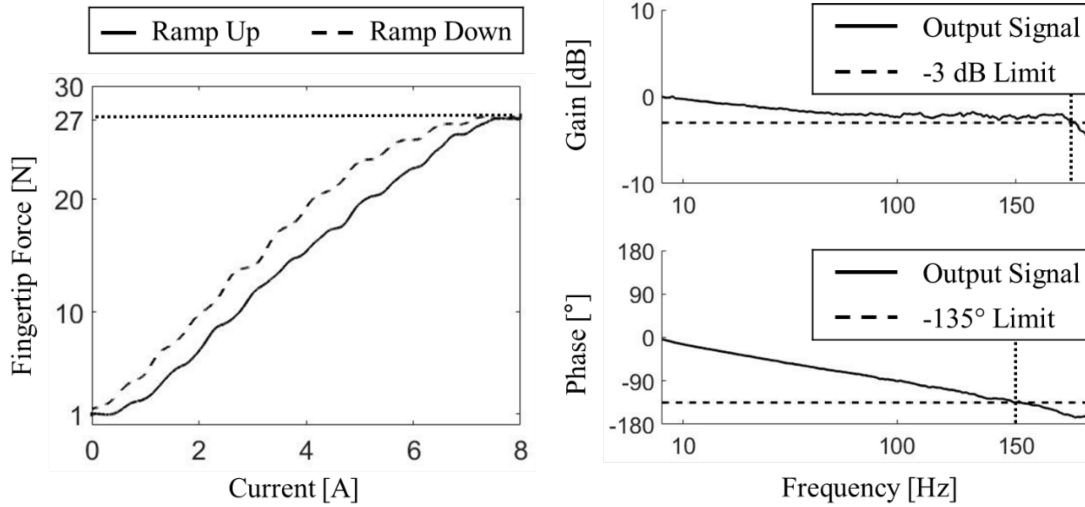


Fig. 3.9 : Result of Maximum Fingertip Force and Dynamic Response

Robotic Arm: A maximum force of 55 N is measured at the end-effector (see Fig. 3.10) by ramping the current between 0 A to 8 A. Dynamic response is tested with a logarithmic chirp for frequencies ranging 0 Hz to 20 Hz with a torque oscillating from 0 Nm to 4 Nm (corresponding to 0 A to 1 A). An amplitude-limited blocked-force bandwidth of is measured at 16 Hz in the weakest workspace configuration (see Fig. 3.10). Since the phase is not the limiting point, signal boosting with amplitude compensation could be used to further increase the bandwidth.

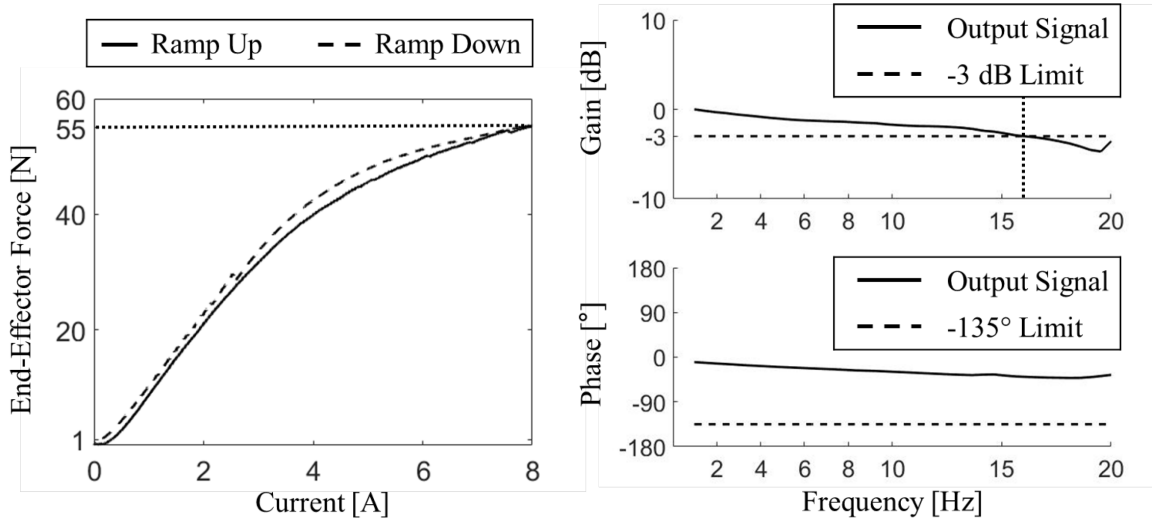


Fig. 3.10 : Result of Maximum End-Effector Force and Dynamic Response

Reliability and robustness were tested on two robotic arms. Both arms were used for VR simulations and performance tests combining more than 200 hours of operation without failures or

signs of performance degradation. Repeated impact tests (>1000) generating end-effector loads in the excess of 100 N didn't damage the robotic arm (see Fig. 3.11) [30].

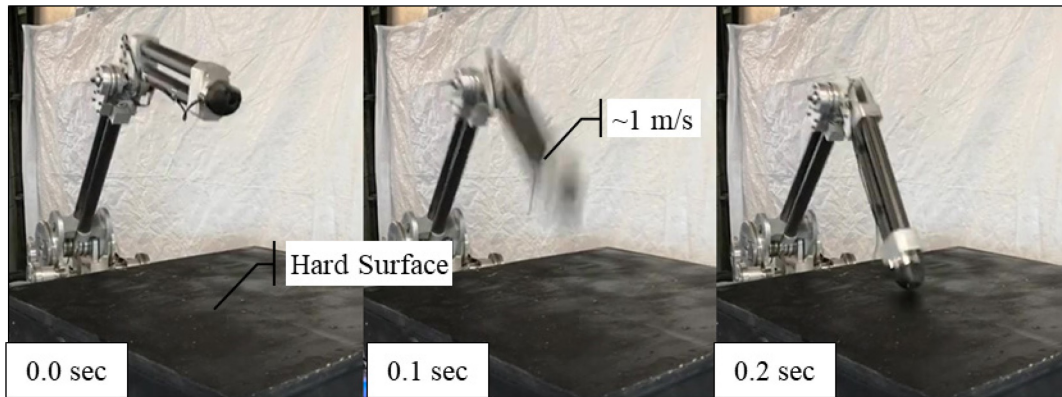


Fig. 3.11 : The Robotic Arm Repeated Impacts Test

3.6.2 User Experience Tests

The haptic system (two robotic arms and the haptic glove on the right hand) has been tested with users in a VR gaming environment where players must perform various tasks. Gravity is compensated in the control such that the system feels weightless.

Methodology

10 test subjects played a custom VR game consisting in accomplishing three challenges:

1. The first is to open castle gates by pushing on a button (see Fig. 3.12(a)). By performing this task, user can feel reaction force at fingertips and a vertical reaction force (see Fig. 3.12(b)) when the button is fully depressed.
2. The second is to hit zombies with a virtual slingshot with a predefined spring gradient (see Fig. 3.13(a)). Users can test the high quality of force of the system by feeling the linear spring rate regardless of their motion speed (see Fig. 3.13(b)).
3. The third is to defeat a virtual dragon by throwing magic balls (see Fig. 3.14). To throw a ball, the user opens his right hand. Thereby, the ball start growing in his hand and, at the same time, the fingertips start vibrating until the user close his hand to throw the ball. The robotic arm generates a sudden recoil force when the ball is thrown. In addition, using the

left robotic arm, a sudden recoil force is generated when the dragon fightback by throwing fireballs at the user's green shield.

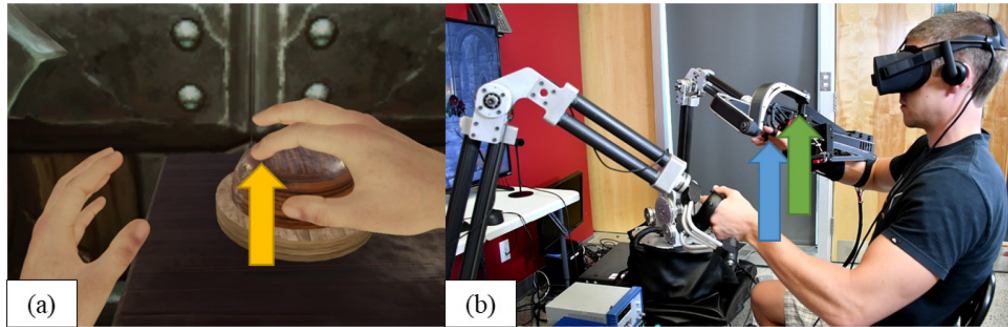


Fig. 3.12 : (a) Virtual Wall Force (Yellow Arrow), (b) Fingertip Force (Blue Arrow) Combine to a Vertical Cartesian Force (Green Arrow) Applied in the Middle of the Glove.

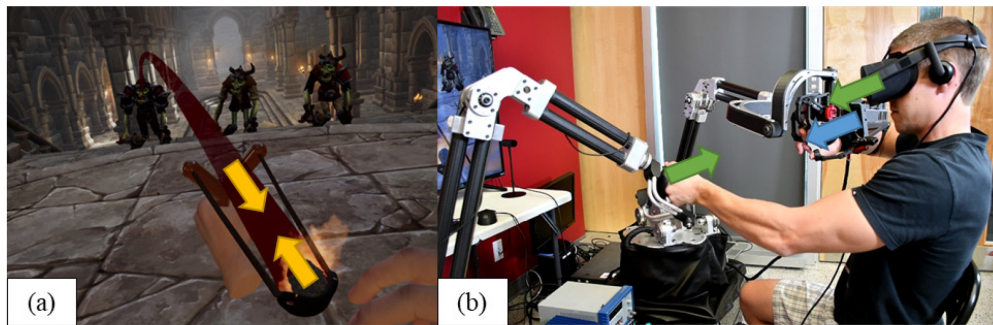


Fig. 3.13 : (a) Virtual Forces from Slingshot Spring (Yellow Arrows), (b) Resulting virtual forces on Robotic Arms (Green Arrows) and Fingertip Forces (Blue Arrow)

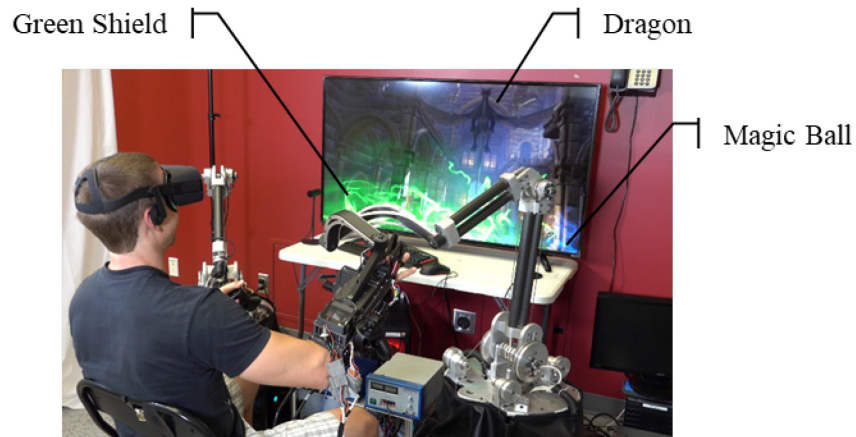


Fig. 3.14 : Dragon Trial

Results

The users unanimously recognize that the haptic TDM-MR system offers an overall positive immersive experience. Indeed, all of them were easily immersed in the virtual environment, forgetting they were holding two robotic arms and a haptic glove. Indeed, the gravity compensation

provided a non-exhausting experience while the open-loop control and robotic arm generated forces at a high enough frequency to be transparent to the user. The most recurrent appreciations were the slingshot and impacts of the fireball on the magical shield. Users were really surprised of the realness of the virtual spring and surprised by the instantaneous force upon the virtual impact. The passive gimbal was the only problematic component. Indeed, gimbal locks could occur when users were moving far away in the workspace. Apart from that, all participants were demanding for more, showing the appreciation of the demo.

3.7 Conclusion

This paper presents a feasibility study of the TDM-MR technology used in a shared-actuation configuration for a 7-DOF haptic system for VR interaction by designing and evaluating the performance of a 4-DOF haptic exoskeleton glove and a 3-DOF haptic robotic arm.

Performance of the haptic glove and the robotic arm have been successfully tested and shown to meet requirements of force levels, dynamic response, reliability and impact resistance. Using the shared-actuation configuration for the 7-DOF haptic system allow to keep the whole mechanism simple and robust. Immersion experiments with 10 users confirm the realness of the simulation and the added value to the VR immersion in gaming.

Overall, the results from this feasibility study suggest the shared-actuation TDM-MR approach to be a relevant technology for collaborative robotic applications with the highest performance requirements such as VR touch feedback. The result could generalize to all collaborative robotic applications, making TDM-MR a practical high-performance robotic solution for man-machine interaction.

3.8 Lessons Learned and Future Works

1. The main challenge of the haptic glove is to reduce its size and weight of 1.37 kg. Considering that the glove has excessive dynamic capabilities with a force bandwidth of 150 Hz (compared to a target of 15Hz), the most logical strategy to reduce weight is to increase the gearing between the clutches and the fingers to further reduce the clutch size.

It is anticipated that clutch and motor size could easily be reduced in half without affecting dynamic performance, which would almost cut weight in half.

2. The haptic glove has limitations in terms of the number of degrees of freedom (only 4). With 8 degrees of freedom, the haptic glove would allow all relevant movements of the fingers for an intrinsic manipulation of virtual objects [31].
3. The fixed base of the robotic arm limits possible VR experiences because the user must be seated. Being seated limits the user's body motion, With a 0.9 m radius workspace per robotic arm, the system offers a reasonable workspace for the user to interact with the virtual environment but more liberty be achieved by replacing the fixed-base robotic arms by a pair of wearable robots allowing the user to move in a VR room [32][33].
4. The user's hand position tracked by the *Oculus*'s system has a low spatial resolution. According to the *Oculus*'s system, spacial resolution of 0.3 mm is less than the spatial resolution of 0.055mm for haptic interfaces such as *3dsystems*' touch robotic arm. Poor spatial resolution limits the maximal stiffness generated by haptic system [29]. Therefore, simulating high stiffness virtual wall cause energy leak and break the immersion [34]. This problem can be fixed by using the encoders of the robotic arm to measure hand position.
5. Gimbal locks could occur when users were moving far away in the workspace. This problem can be fixed by adding an active 3-DOF wrist replacing the passive gimbal and the forearm of the robotic arm. Thereby, torque could be transmitted to user hand. The 3-DOF wrist would be an independent device in the shared-actuation configuration powered by its own geared motor distributing power to a subset of MR clutches.

CHAPITRE 4

CONCLUSION

4.1 Sommaire

L'objectif de ce projet de recherche était d'évaluer le potentiel de la technologie TDM-MR utilisée dans une configuration d'actionnement semi-distribuée pour un système haptique 7 ddls pour l'interaction VR en concevant et en évaluant les performances d'un gant d'exosquelette haptique 4 ddls et d'un gant haptique 3 ddls bras robotique.

Les performances du gant haptique et du bras robotique ont été testées avec succès et ont démontré qu'elles répondent aux exigences de niveaux de force, de réponse dynamique, de fiabilité et de résistance aux chocs. L'utilisation de la configuration d'actionnement semi-distribué pour le système haptique à 7 ddls permet de garder l'ensemble du mécanisme simple et robuste. Des expériences d'immersion avec 10 utilisateurs confirment la réalité de la simulation et la valeur ajoutée de l'immersion VR dans les jeux.

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude de faisabilité suggèrent que l'approche d'activation semi-distribuée reliant plusieurs sous-systèmes TDM-MR est une technologie pertinente pour les applications robotiques collaboratives les plus exigeantes telles que la rétroaction tactile VR. Le résultat pourrait être généralisé à toutes les applications robotiques collaboratives, faisant du TDM-MR une solution robotique pratique à hautes performances pour l'interaction homme-machine.

4.2 Contributions originales

La contribution principale de ce projet de recherche est la **conception d'une configuration à actionnement semi-distribuée utilisant la technologie TDM-MR** pour des applications haptiques en réalité virtuelle. Cette configuration permet à un système utilisant la technologie TDM-MR multi-ddls de conserver sa simplicité de mécanisme et sa robustesse permettant une conception simple, peu importe le large nombre de ddls

De cette contribution principale découle trois contributions secondaires :

- **La conception d'un gant haptique 4 ddls à retour de force.** Ayant les mêmes propriétés que l'humain en terme de force et de réponse dynamique. À cet effet, une force maximale de 27 N est mesurée au bout des doigts. Une bande passante à force bloquée à phase limitée est mesurée à 150 Hz, ce qui dépasse les exigences attendues.
- **La conception d'embrayages MR miniatures (<100g).** Le gant haptique nécessite les embrayages MR les plus performants en termes de réponses dynamiques car ils interagissent avec les doigts humains à action rapide. L'utilisation d'un matériau non magnétique pour les surfaces de cisaillement s'est avérée améliorer le rapport couple / inertie, et donc les performances dynamiques, d'un facteur 1,6, car l'inertie diminue plus rapidement que les capacités de contrainte de cisaillement. Les embrayages dépassent de loin les requis fixés au départ. Ceux-ci pourront donc être optimisés dans un futur projet. La stratégie la plus logique pour réduire le poids consiste à augmenter l'engrenage entre les embrayages MR et les doigts pour réduire davantage la taille de l'embrayage. Il est prévu que la taille de l'embrayage et du moteur pourrait être réduite de moitié sans affecter les performances dynamiques.
- **Le contrôle de sous-système d'actionnement en simultané: le gant haptique et le bras robotique.** Le contrôle du gant haptique et du bras robotique s'est fait à l'aide d'un ordinateur envoyant des commandes de force aux 2 contrôleurs à temps réel *SpeedGoat*, un pour le gant haptique et un pour les deux bras robotiques.

4.3 Perspectives et travaux futurs

Ce projet de recherche démontre le potentiel d'une configuration à actionnement semi-distribuée utilisant la technologie TDM-MR pour système haptique multi-ddls en réalité virtuelle. Une telle configuration pourrait être étendue à d'autres applications propices d'utiliser la technologie TDM-MR telle qu'un système de téléopération maître-esclave.

D'autres parts, certains aspects du système haptique TDM-MR peuvent faire l'objet de travaux futurs :

- Le principal défi concernant le gant haptique est de réduire sa taille et son poids de 1,37 kg de moitié. Étant donné que le gant a des capacités dynamiques excessives avec une bande passante de force de 150 Hz (par rapport à un objectif de 15 Hz), la stratégie la plus logique

pour réduire le poids consiste à augmenter le ratio d'engrenage entre les embrayages et les doigts pour réduire davantage la taille de l'embrayage. La taille de l'embrayage et du moteur pourrait être réduite de moitié tout en atteignant les performances dynamiques souhaitées, ce qui réduirait presque de moitié de la masse des embrayages.

- Le gant haptique est limité en termes de nombre de degrés de liberté (seulement 4). Avec 8 ddls, le gant haptique permettrait tous les mouvements pertinents des doigts pour une manipulation intrinsèque des objets virtuels [31].
- La base fixe du bras robotique limite les expériences VR possibles car l'utilisateur doit être assis. Être assis limite les mouvements du corps de l'utilisateur. Avec un espace de travail de 0,9 m de rayon par bras robotique, le système offre un espace de travail raisonnable pour que l'utilisateur interagisse avec l'environnement virtuel, mais plus de liberté est obtenue en remplaçant les bras robotiques à base fixe par une paire de robots portables permettant à l'utilisateur de se déplacer dans une salle de VR [32], [33].
- La position de la main de l'utilisateur suivie par le système *Oculus* a une faible résolution spatiale. Selon le système *Oculus*, la résolution spatiale de 0,3 mm est inférieure à la résolution spatiale de 0,055 mm pour les interfaces haptiques telles que le bras robotique tactile de *3Dsystems*. Une mauvaise résolution spatiale limite la rigidité maximale générée par le système haptique [29]. Par conséquent, la simulation d'une paroi virtuelle à rigidité élevée provoque une fuite d'énergie et rompt l'immersion [34]. Ce problème peut être résolu en utilisant les encodeurs du bras robotique pour mesurer la position de la main.
- Des coincements de la gimbal 3-ddls peuvent se produire lorsque les utilisateurs se déplacent loin dans l'espace de travail. Ce problème peut être résolu en ajoutant un poignet actif à 3 ddls remplaçant la gimbal passive et l'avant-bras du bras robotique. Ainsi, le couple pourrait être transmis à la main de l'utilisateur. Le poignet 3-ddls serait un appareil indépendant dans la configuration à actionnement partagé alimenté par son propre motoréducteur distribuant la puissance à un sous-ensemble d'embrayages MR.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] S. R. Ellis, « What are virtual environments? », *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 14, n° 1, p. 17-22, janv. 1994, doi: 10.1109/38.250914.
- [2] J. Blake et H. B. Gurocak, « Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality », *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 14, n° 5, p. 606-615, oct. 2009, doi: 10.1109/TMECH.2008.2010934.
- [3] J. Viau, P. Chouinard, J. L. Bigué, G. Julió, F. Michaud, et J. Plante, « Tendon-Driven Manipulator Actuated by Magnetorheological Clutches Exhibiting Both High-Power and Soft Motion Capabilities », *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 22, n° 1, p. 561-571, févr. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2016.2605379.
- [4] J. Viau, P. Chouinard, J. L. Bigué, G. Julió, F. Michaud, et J. Plante, « Tendon-Driven Manipulator Actuated by Magnetorheological Clutches Exhibiting Both High-Power and Soft Motion Capabilities », *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 22, n° 1, p. 561-571, févr. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2016.2605379.
- [5] N. Miyata, K. Yamaguchi, et Y. Maeda, « Measuring and modeling active maximum fingertip forces of a human index finger », in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, oct. 2007, p. 2156-2161, doi: 10.1109/IROS.2007.4399243.
- [6] « Haptipedia | Accelerating Haptic Device Discovery ». <https://haptipedia.org/?device=Haption6DOF2001c> (consulté le déc. 06, 2019).
- [7] P. I. Corp, « Plexus / High-performance VR/AR Gloves ». <http://plexus.im/index.html> (consulté le avr. 23, 2019).
- [8] « World's leading VR Gloves for training », *Manus VR*. <https://manus-vr.com/> (consulté le avr. 23, 2019).
- [9] « VRfree glove system », *VRfree® glove - intuitive VR interaction*. http://www.sensoryx.com/product/vrfree_glove_system/ (consulté le avr. 23, 2019).
- [10] M. İ. C. Dede, Ö. Selvi, T. Bilgincan, et Y. Kant, « Design of a haptic device for teleoperation and virtual reality systems », in *2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, oct. 2009, p. 3623-3628, doi: 10.1109/ICSMC.2009.5346857.
- [11] M. Bégin *et al.*, « Experimental Assessment of a Controlled Slippage Magnetorheological Actuator for Active Seat Suspensions », *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 23, n° 4, p. 1800-1810, août 2018, doi: 10.1109/TMECH.2018.2836351.
- [12] S. Varga, « HaptX | Haptic gloves for VR training, simulation, and design », *HaptX*. <https://haptx.com/> (consulté le oct. 28, 2019).
- [13] M. Bouzit, G. C. Burdea, et G. V. Popescu, « The Rutgers Master II-new design force-feedback glove », 2002, doi: 10.1109/TMECH.2002.1011262.
- [14] « CyberForce », *CyberGlove Systems LLC*. <http://www.cyberglovesystems.com/cyberforce> (consulté le avr. 23, 2019).
- [15] « Dexta Robotics - Touch the Untouchable-岱仕科技 - 触摸虚实的边界 ». <https://www.dextarobotics.com/en-us> (consulté le oct. 18, 2019).
- [16] « Barrett Technology ». <https://www.barrett.com/> (consulté le sept. 22, 2019).
- [17] « Virtuouse™ 6D - HAPTION SA ». <https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-6d-fr.html> (consulté le janv. 10, 2020).
- [18] « Cobot UR5e - bras Robotique Collaboratif d'Universal Robots ». <https://www.universal-robots.com/fr/produits/robot-ur5/> (consulté le nov. 06, 2019).
- [19] « Virtual Reality in Entertainment », *Thinkmobiles*. <https://thinkmobiles.com/blog/virtual-reality-entertainment/> (consulté le avr. 23, 2019).
- [20] « Getting to Grips with Haptic Technology », *Virtual Reality Society*, juin 12, 2017. <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality-gear/haptic/> (consulté le avr. 23, 2019).

- [21] V. Popescu, G. Burdea, et M. Bouzit, « Virtual reality simulation modeling for a haptic glove », in *Proceedings Computer Animation 1999*, mai 1999, p. 195-200, doi: 10.1109/CA.1999.781212.
- [22] D. Gomez, G. Burdea, et N. Langrana, « Integration of the Rutgers Master II in a virtual reality simulation », in *Proceedings Virtual Reality Annual International Symposium '95*, mars 1995, p. 198-202, doi: 10.1109/VRAIS.1995.512496.
- [23] C. d C. Teixeira et J. C. d Oliveira, « Right Hand Rehabilitation with CyberForce, CyberGrasp, and CyberGlove », in *2015 XVII Symposium on Virtual and Augmented Reality*, mai 2015, p. 186-189, doi: 10.1109/SVR.2015.34.
- [24] « Dexta Robotics - Touch the Untouchable ». <https://www.dextarobotics.com/en-us> (consulté le avr. 09, 2019).
- [25] S. Das, Y. Kishishita, T. Tsuji, C. Lowell, K. Ogawa, et Y. Kurita, « ForceHand Glove: A Wearable Force-Feedback Glove With Pneumatic Artificial Muscles (PAMs) », *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, n° 3, p. 2416-2423, juill. 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2813403.
- [26] « Specifications-of-WAM-Arm.pdf ». Consulté le: nov. 06, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.gelecekrobotik.com.tr/wp-content/uploads/2015/03/Specifications-of-WAM-Arm.pdf>.
- [27] « Armeo®Power », *Hocoma*. <https://www.hocoma.com/solutions/armeo-power/> (consulté le avr. 25, 2019).
- [28] C. Borst, M. Fischer, S. Haidacher, H. Liu, et G. Hirzinger, « DLR hand II: experiments and experience with an anthropomorphic hand », in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, sept. 2003, vol. 1, p. 702-707 vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.2003.1241676.
- [29] J. J. Abbott et A. M. Okamura, « Effects of position quantization and sampling rate on virtual-wall passivity », *IEEE Trans. Robot.*, vol. 21, n° 5, p. 952-964, oct. 2005, doi: 10.1109/TRO.2005.851377.
- [30] User Exonetik, *Robot impacting a hard surface*. .
- [31] « ExoHand | Festo Entreprise ». <https://www.festo.com/group/fr/cms/10233.htm> (consulté le nov. 15, 2018).
- [32] « A High-Bandwidth Back-Drivable Hydrostatic Power Distribution System for Exoskeletons Based on Magnetorheological Clutches - IEEE Journals & Magazine ». <https://ieeexplore.ieee.org/document/8307413> (consulté le mars 21, 2019).
- [33] « A Lightweight Force-Controllable Wearable Arm Based on Magnetorheological-Hydrostatic Actuators - IEEE Conference Publication ». <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8793978> (consulté le déc. 09, 2019).
- [34] « (2) (PDF) Measuring and Increasing Z-Width with Active Electrical Damping ». https://www.researchgate.net/publication/4325055_Measuring_and_Increasing_Z-Width_with_Active_Electrical_Damping (consulté le nov. 07, 2019).